

IV. 励磁电流

➤ 忽略电阻压降和漏磁电势， $U_1 = E_1 = 4.44fN_1\Phi_m$ ， $\Phi_m \propto U_1$ ，
即：当外施电压 U_1 为定值，主磁通 Φ_m 也为一定值

★ 重要结论：

- 变压器主磁通大小主要取决于电网电压、频率和匝数
- 与负载情况基本无关！

Q1：一台额定条件下工作在 220V/50Hz 的单相变压器，
错接在 220V/60Hz 的交流电源上，则主磁通会()，
变压器磁路饱和程度 ()。

A 不变 B 变小 C 变大 D 不确定



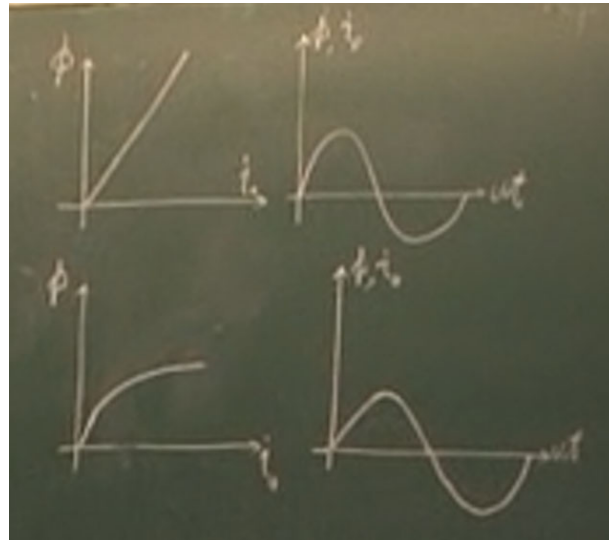
IV. 励磁电流

Q：一台结构已定的变压器，当外施电压为已知，需要电源提供多大的励磁电流呢？励磁电流包括哪些成分呢？

A：决定于变压器的铁芯材料及铁芯几何尺寸。因为铁芯材料是磁性物质，励磁电流的大小和波形将受磁路饱和、磁滞及涡流的影响。



IV. 励磁电流



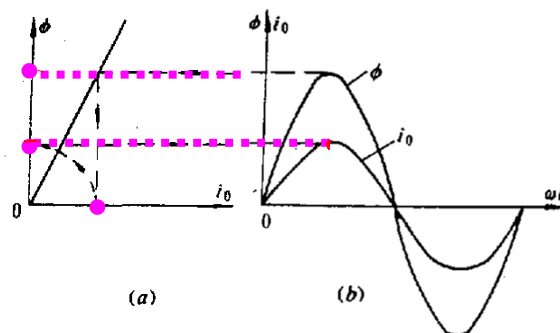
IV. 励磁电流

不考虑磁路饱和影响

- 当 $B_m < 0.8T$, 磁路未饱和状态, 磁化曲线

$\Phi = f(i)$ 呈线性, 导磁率是常数

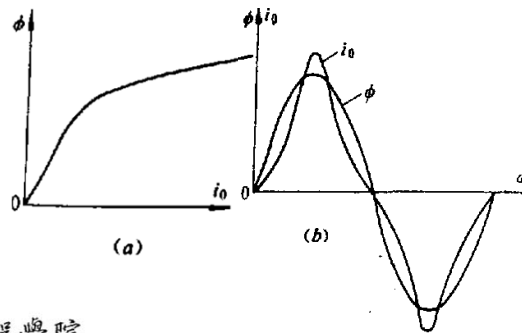
- 当 Φ 按正弦变化, i 亦按正弦变化



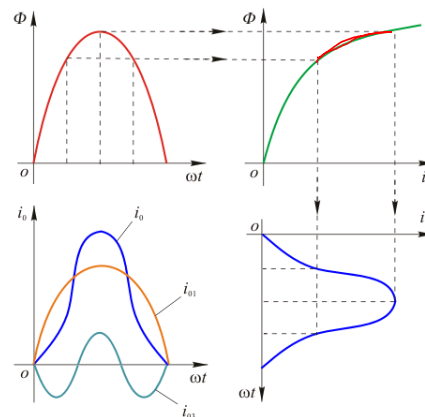
IV. 励磁电流

考虑磁路饱和影响

- 如 $B_m > 0.8T$ ，磁路开始饱和， $\Phi = f(i)$ 呈非线性，随 i 增大导磁率逐渐变小
- 磁通 Φ 为正弦波， i 为尖顶波，尖顶的大小取决于饱和程度



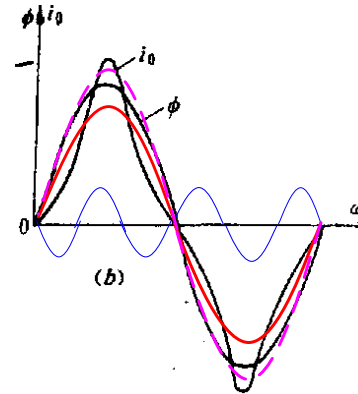
- 如 $B_m > 0.8T$ ，磁路开始饱和， $\Phi = f(i)$ 呈非线性，随 i 增大导磁率逐渐变小
- 磁通 Φ 为正弦波， i 为尖顶波，尖顶的大小取决于饱和程度



IV. 励磁电流

磁路饱和影响

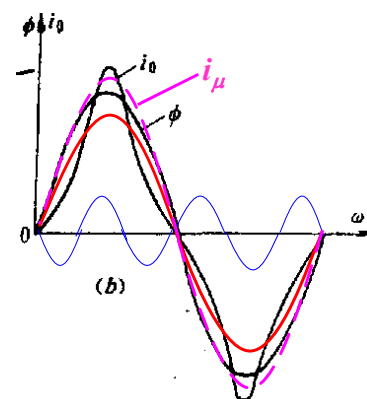
- 对尖顶波进行波形分析，除基波分量外，包含有各奇次谐波，其中以3次谐波幅值最大
- 用等效正弦波电流替代实际尖顶波电流
- 等效原则：令等效正弦波与尖顶波有相同的有效值，与尖顶波的基波分量有相同频率且同相位



IV. 励磁电流

磁路饱和影响

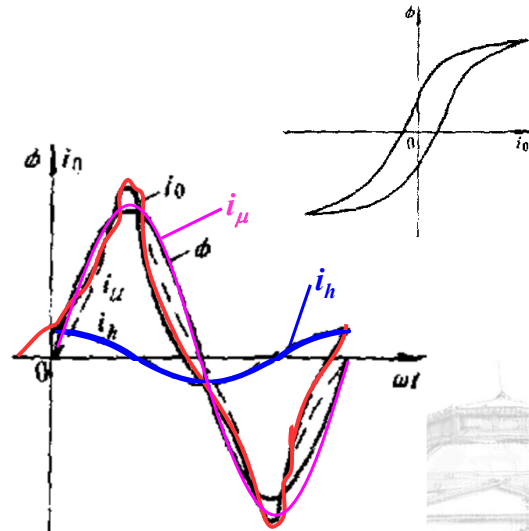
- 磁化电流 \dot{I}_μ , \dot{I}_μ 与 $\dot{\Phi}_m$ 同相位
- \dot{I}_μ 滞后于 $-\dot{E}_1$ 90° , \dot{I}_μ 具有无功电流性质
- \dot{I}_μ 是励磁电流的主要成分



IV. 励磁电流

考虑磁滞现象影响

- 励磁电流是**不对称尖顶波**，可分解成**两个分量**：
- 对称的尖顶波 i_μ ，是磁路饱和和所引起的，即**磁化电流分量**
- 近似正弦波电流分量 i_h ，频率为**基波频率**，**磁滞电流分量** i_h 与 $-\dot{E}_1$ 同相位，是**有功分量**电流



IV. 励磁电流

涡流影响

- 交变磁通 Φ 在铁芯中**感应电势**，在铁芯中产生**涡流**及**涡流损耗**。涡流电流分量 i_e 由涡流引起的，与涡流损耗对应， i_e 与 $-\dot{E}_1$ 同相位，是**有功电流分量**
- 由于**磁路饱和**、**磁滞**和**涡流**三者同时存在，励磁电流实际包含 i_μ 、 i_h 和 i_e 三个分量
- 由于 i_h 和 i_e **同相位**，合并称为**铁耗电流分量**，用 i_{Fe} 表示
- 励磁电流 i_m 表示为磁化电流 i_μ 和铁耗电流 i_{Fe}

$$\dot{I}_m = \dot{I}_\mu + \dot{I}_h + \dot{I}_e = \dot{I}_\mu + \dot{I}_{Fe}$$



V. 励磁特性的电路模型

- 励磁电流 \dot{I}_m 表示为磁化电流 \dot{I}_μ 和铁耗电流 \dot{I}_{Fe}
- \dot{I}_{Fe} 与 $-\dot{E}_1$ 同相位, \dot{I}_μ 滞后 $-\dot{E}_1$ 90°

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Fe} &= g_m(-\dot{E}_1) \\ \dot{I}_\mu &= -jb_m(-\dot{E}_1) \end{aligned} \quad \rightarrow \quad \dot{I}_m = (g_m - jb_m)(-\dot{E}_1)$$

- 铁耗 P_{Fe}

$$P_{Fe} = I_{Fe} E_1 = g_m E_1^2$$

- 励磁无功功率 Q_μ

$$Q_\mu = I_\mu E_1 = b_m E_1^2$$

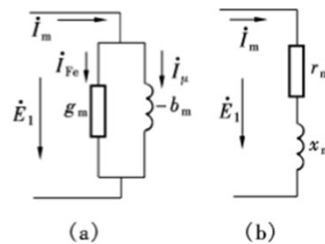


图 2-12 励磁等效电路

(a) 导纳电路; (b) 阻抗电路



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号

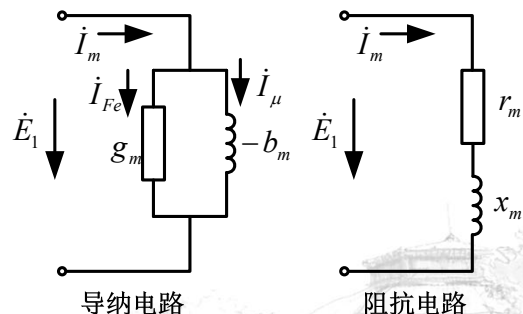
11/17

V. 励磁特性的电路模型

- 将并联的**导纳**参数换成串联的**阻抗**参数 \rightarrow

$$\frac{-\dot{E}_1}{\dot{I}_m} = \frac{1}{g_m - jb_m} = \frac{g_m}{g_m^2 + b_m^2} + j \frac{b_m}{g_m^2 + b_m^2} = r_m + jx_m = Z_m$$

- 强调: r_m 并非**实质电阻**, 是为计算铁耗引进的**模拟电阻**
- 由于磁化曲线呈**非线性**, 参数 Z_m 随电压而变化, **不是常数**
- 变压器正常运行时, 外施电压等于或近似等于额定电压, 且变动范围不大, 可把 Z_m 看成**常数**
- x_m 是主磁通引起的电抗, 为励磁电抗



导纳电路

阻抗电路

励磁等效电路



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

12/17

Q1: 变压器中的励磁电阻 R_m 反映的是 ()。

A 铜耗 B 铁耗 C 绕组电阻 D 机械损耗

Q2: 如果将变压器的铁心抽出，励磁电抗 x_m 将 ()。

A 变大 B 变小 C 不变 D 不确定

思考题：说明变压器励磁电抗 x_m 的物理意义。在变压器中希望 x_m 大好还是小好？增加一次绕组匝数 x_m 是增大还是减小？



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

13

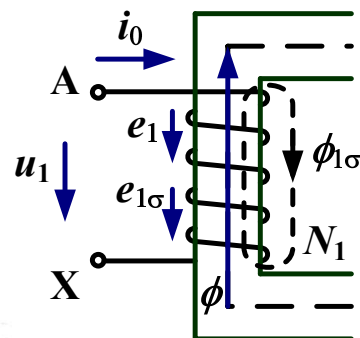
VI. 漏抗

- 描述漏磁电势的电路参数
- 由于漏磁通所经路径主要为非磁性物质（空气），磁阻为常数
- 漏磁通与产生该漏磁通的电流成正比且同相位，漏电感亦为常数

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t \quad \Phi_{1\sigma} = \Phi_{1\sigma m} \sin \omega t$$

$$\rightarrow L_{1\sigma} = \frac{\psi_{1\sigma m}}{I_{1m}} = \frac{N_1 \Phi_{1\sigma m}}{\sqrt{2} I_1}$$

$$\dot{E}_{1\sigma} = -j\omega L_{1\sigma} \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_1 = -jx_1 \dot{I}_0$$



东南大学电气工程学院
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING, SEU

南京 四牌楼2号 <http://ee.seu.edu.cn>

14/17

VII. 电路方程、等效电路和相量图

电路方程

励磁电流

$$\dot{I}_m = \dot{I}_{Fe} + \dot{I}_\mu = \dot{I}_0$$

励磁支路电压降

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_m Z_m$$

一次电压平衡方程

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

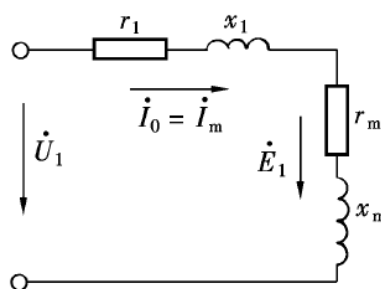
二次电压平衡方程

$$\dot{U}_{20} = \dot{E}_2$$



VII. 电路方程、等效电路和相量图

等效电路



- $r_m + jx_m$ 上的压降表示主磁通对变压器的作用，随外施电压的增加而减小，由于饱和影响
- x_1 表示漏磁通对电路的影响，近似为常数

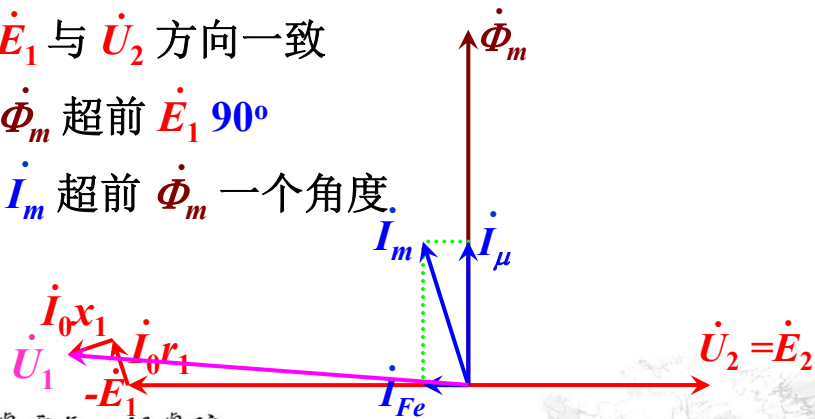


VII. 电路方程、等效电路和相量图

相量图

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1$$

- \dot{U}_2 (参考方向), 求 \dot{U}_1
- \dot{E}_1 与 \dot{U}_2 方向一致
- $\dot{\Phi}_m$ 超前 \dot{E}_1 90°
- \dot{I}_m 超前 $\dot{\Phi}_m$ 一个角度



Q2: 将铭牌为50Hz 的单相变压器, 错接在60Hz的电网上运行, 额定电压不变, 试分析对主磁通, 激磁电流, 铁耗, 漏抗有何影响?

